

WORKING PAPER PSPHUB

**RISCOS CLIMÁTICOS UMA
ANÁLISE ECONOMETRICA:
Biomas Cerrado, Amazônia e**

Mario Antonio Margarido

Rogério Acca

15 de julho de 2026

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	4
2. OBJETIVO	7
3. DADOS	7
4. MÉTODO	12
5. ANÁLISE DE RESULTADOS	14
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	23
7. LITERATURA CITADA	24

RISCOS CLIMÁTICOS UMA ANÁLISE ECONOMETRICA: Biomas Cerrado, Amazônia e Caatinga

Mario Antonio Margarido¹

Rogério Acca²

RESUMO: Este trabalho analisa os impactos dos riscos climáticos sobre os desembolsos de crédito do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) nos biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga. Utilizando uma série histórica municipal (1985–2024) que integra dados de transição de uso do solo (MapBiomas), variáveis climáticas de precipitação e temperatura (NASA POWER) e registros de crédito da instituição, estimou-se um modelo econométrico de dados em painel com efeitos fixos e distribuição de Poisson. Para capturar os choques hídricos exógenos de longo prazo, adotou-se o Índice de Precipitação Evapotranspiração Padronizado com janela de 12 meses (SPEI-12). Os resultados demonstram que a dinâmica de transmissão dos choques climáticos varia conforme o ecossistema regional, na Caatinga, o impacto positivo de anomalias de chuva sobre o valor contratado é imediato e altamente expressivo (efeito contemporâneo), enquanto na Amazônia o reflexo ocorre de forma defasada em um ano devido aos ciclos de planejamento de longo prazo e à burocracia regional. O bioma Cerrado exibiu neutralidade estatística no curto prazo, sugerindo que o uso de tecnologias como a irrigação atenua os impactos imediatos das oscilações pluviométricas.

Palavras-chave: Crédito de Fomento. Riscos Climáticos. SPEI-12. Dados em Painel. Biomas Brasileiros.

ABSTRACT: This study analyzes the impact of climate risks on credit disbursements by the Brazilian National Development Bank (BNDES) across the Amazon, Cerrado, and Caatinga biomes. Using a municipal historical series (1985–2024) integrating land use transition data (MapBiomas), climate variables for precipitation and temperature (NASA POWER), and the bank's credit records, an econometric panel data model with fixed effects and Poisson distribution was estimated. To capture long-term exogenous hydrological shocks, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index with a 12-month window (SPEI-12) was employed. The findings demonstrate that the transmission dynamics of climate shocks vary across regional ecosystems: in the Caatinga, the positive impact of rainfall anomalies on contracted values is immediate and highly significant (contemporaneous effect), whereas in the Amazon, the effect is lagged by one year due to long-term planning cycles and regional

¹ Pós Doutor em Economia (EESP/FGV), Doutor em Economia Aplicada (ESALQ/USP), Mestre em Economia de Empresas (EAESP/FGV), Economista (FEA/USP). Senior Partner e Líder de Econometria da Pezco Economics. Pesquisador do PSP Hub. Email: mario.margarido@pezco.com.br

² Doutor (PhD) em Políticas Públicas (Cornell University), Mestre em Sociologia (FFLCH/USP), Cientista Social (FFLCH/USP). Consultor do Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Consultor Associado da Fractal Assessoria Desenvolvimento de Negócios. Email: ra239@cornell.edu

bureaucracy. The Cerrado biome exhibited statistical neutrality in the short term, indicating that technologies such as irrigation mitigate the immediate impacts of rainfall fluctuations.

Keywords: Development Credit. Climate Risks. SPEI-12. Panel Data. Brazilian Biomes.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos climáticos afetam os desembolsos de crédito do BNDES por meio de uma dinâmica de choques de oferta e demanda, além de induzirem mudanças estruturais na política de concessão de crédito do banco. Como o BNDES é um dos principais repassadores de recursos do Plano Safra, via linhas governamentais e grande financiador de infraestrutura e transição energética, o clima impacta seus desembolsos de três maneiras principais.

Iniciando pelo Choque de Demanda *Ex-Post*, o qual, também, pode ser denominado de o “Efeito de Crise e Socorro”. Mais precisamente, quando um evento climático extremo ocorre, como por exemplo, a seca histórica no Rio Grande do Sul ou as enchentes severas, a dinâmica de desembolso do BNDES muda abruptamente no curto prazo. Nesse caso, há queda nos desembolsos de Investimento (Capex), ou seja, produtores e empresas afetados por quebras de safra ou destruição de ativos suspendem investimentos de longo prazo como compra de maquinário, expansão de plantas etc. A demanda por linhas tradicionais de investimento cai. O BNDES frequentemente atua de forma contracíclica. Após um desastre, há um pico de desembolsos em linhas emergenciais e de refinanciamento de dívidas para evitar a insolvência em massa de cooperativas e produtores, ou seja, há aumento em linhas de Capital de Giro e Reestruturação. Também, o processo de renegociação de dívidas trava o fluxo normal de novas contratações, gerando um represamento temporário nos desembolsos de novas safras.

Também, ocorre Mudança no Risco de Crédito e Restrição de Oferta, em outras palavras, o risco climático afeta a capacidade de pagamento dos tomadores, o que altera o comportamento dos agentes financeiros parceiros, tais como, bancos privados e cooperativas que repassam o dinheiro do BNDES. Mesmo que as taxas do BNDES sejam equalizadas ou subsidiadas, as instituições financeiras na ponta tornam-se mais criteriosas e avessas ao risco

em regiões com histórico de quebras severas, por exemplo, transição para o MATOPIBA ou áreas de estresse hídrico. Isso resulta no aumento do *Spread* de Risco. Outro aspecto reside na exigência de mitigação, isto é, o desembolso fica condicionado à contratação de seguros agrícolas robustos ou à comprovação de mitigação de risco (como sistemas de irrigação). Se o custo do seguro sobe devido ao clima, o custo total da operação aumenta, desincentivando o tomador.

O terceiro aspecto foca no Direcionamento Estrutural dos Desembolsos (*Green Bonds* e Transição). No médio e longo prazo, o clima redefine para onde o dinheiro do BNDES flui. O banco tem direcionado seus desembolsos para induzir a resiliência climática. Há um crescimento acelerado nos desembolsos de linhas voltadas para a descarbonização, agricultura de baixo carbono (linhas ABC+), recuperação de pastagens degradadas e energias renováveis, os quais são derivados do Fundo Clima e Linhas Verdes. O BNDES adota critérios Ambiental, Social e Governança (ASG) e cruzamento de dados geográficos para o desembolso. Áreas com embargos ambientais, desmatamento ilegal ou desconformes com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) têm o desembolso bloqueado. Portanto, a degradação climática/ambiental regional restringe o mercado elegível.

A Figura 1 apresenta as delimitações dos três biomas de interesse do estudo, Amazônia, Cerrado e Caatinga com base no Mapbiomas.

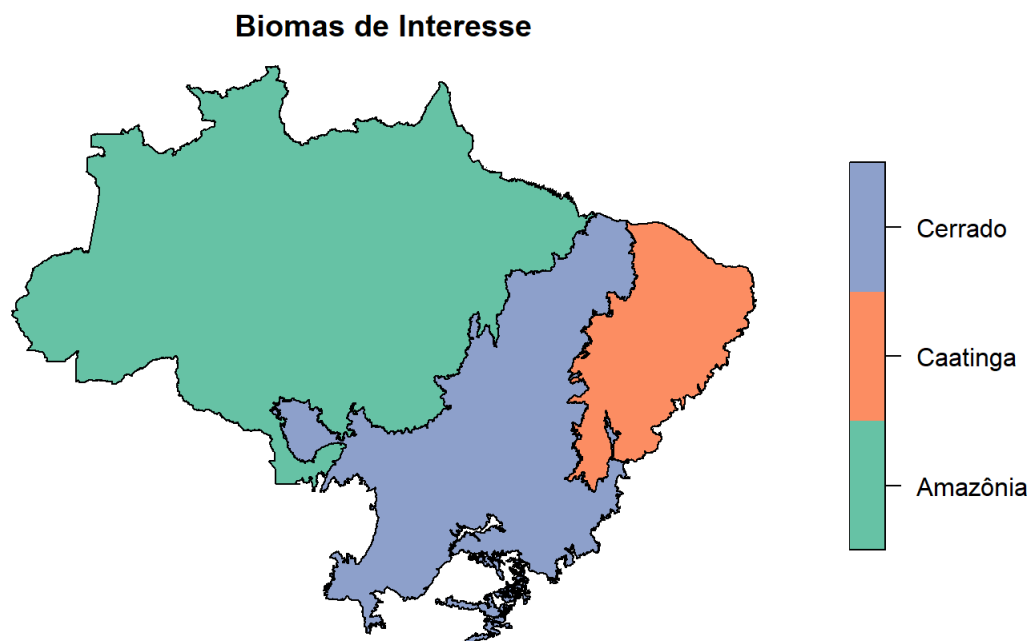


Figura 1. Biomass de Interesse, Amazônia, Cerrado e Caatinga.
Fonte: Elaborada pelos autores com base em dados do MapBiomass.

Na Amazônia, o foco da análise de crédito costuma recair sobre a manutenção da floresta em pé e a regularidade ambiental.

Como o Cerrado é a fronteira agrícola do país, o mapeamento regional aqui deve considerar a logística e a disponibilidade de recursos hídricos.

Objetiva-se realizar uma Análise de Impacto de Crédito e Risco, integrando os componentes de políticas públicas e modelagem financeira para os biomas Amazônia, Cerrado e Caatinga. O desafio aqui é isolar o efeito do crédito do BNDES sobre variáveis ambientais e financeiras, controlando por choques externos (como variações climáticas e de preços de *commodities*).

Para cada bioma, o "sucesso" do crédito ou o risco de inadimplência deve ser medido por métricas distintas. No caso da Amazônia, o impacto é medido pela redução da degradação florestal e pelo aumento da produtividade em áreas já desmatadas (intensificação). O risco de

crédito está ligado a sanções ambientais e embargos (risco de transição). Para o Cerrado, o impacto foca na conversão de pastagens degradadas em lavoura (reduzindo a pressão sobre a vegetação nativa). O risco de crédito é fortemente atrelado ao estresse hídrico e quebra de safra (risco físico). Finalmente, no caso da Caatinga, o impacto é medido pela transição energética e segurança hídrica. O risco de crédito está vinculado à resiliência de longo prazo de projetos de infraestrutura frente à desertificação.

2. OBJETIVO

Cruzar dados de desembolsos do BNDES com variáveis climáticas para testar os efeitos de variáveis climáticas sobre os desembolsos do BNDES. Mais especificamente, verificar como Anomalias de Precipitação / Temperatura (*Standardized Precipitation Index* - SPI) e o Índice de Precipitação Evapotranspiração Padronizado (SPEI-12) funcionam como choques exógenos capazes de alterar a dinâmica de contratação de recursos nas regiões estudadas. A análise foca em determinar se as liberações financeiras do banco atuam de forma contracíclica, oferecendo um suporte de reestruturação e capital de giro em momentos de crise, ou se recuam diante do aumento do risco de crédito físico local, gerando um efeito de "tesoura" que restringe o crédito regulamentar exatamente quando o produtor enfrenta quebras severas de safra ou gargalos logísticos estruturais.

3. DADOS

Foi utilizada a série histórica de 1985-2024 da transição do uso do solo, sendo que, as informações são por municípios. No caso da variável clima, foram utilizados dados da NASA POWER, os quais representam precipitação e anomalias térmicas / pluviométricas. Essas variáveis são utilizadas para construir os choques exógenos, como secas severas, excesso de chuvas. Finalmente, foram utilizados dados de crédito cuja fonte é o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES). O objetivo é verificar se o crédito atua como um mitigador ou se ele recua justamente quando o produtor mais precisa devido ao risco climático, gerando um efeito de "tesoura" que pode impulsionar o desmatamento.

Foi necessária a harmonização geográfica dos dados, ou seja, todas as bases foram compatibilizadas para o nível de Município (6 dígitos) para evitar o erro do dígito verificador do IBGE que o MapBiomas utiliza. Também, embora o clima e o crédito possam ter dados mensais, o modelo final está sendo estimado em frequência Anual, que é a periodicidade máxima permitida pelo MapBiomas.

Em econometria de riscos climáticos, a construção desses índices segue um rigor estatístico para garantir que eles representem "choques" (eventos inesperados) e não apenas a sazonalidade comum. Inicialmente, é necessário definir o que é uma anomalia. Primeiro, é necessário definir o que pode ser considerado "normal" para cada município. Inicialmente, calcula-se a média da precipitação (ou temperatura) para um período longo (geralmente 30 anos), ou seja, calcula-se sua média histórica (μ). A seguir, calcula-se a variabilidade histórica desse dado, ou seja, seu respectivo desvio padrão (σ).

Anomalia Padronizada é calculada pela fórmula:

$$Z_{i,t} = \frac{X_{i,t} - \mu_i}{\sigma_i}$$

onde: $Z_{i,t}$ é a anomalia do município i no ano t ; $X_{i,t}$ é o valor observado (chuva total ou temperatura média) naquele período; μ_i é a média histórica específica daquele município e σ_i é o desvio padrão histórico daquele município.

Por que usar a Anomalia em vez do dado Bruto? O uso do dado bruto, por exemplo, mm de chuva causaria viés, pois 100mm de chuva em Cuiabá (MT) significa seca, enquanto em Petrolina (PE) pode significar abundância. Se Anomalia = 0, o clima está exatamente na média histórica, se Anomalia Positiva (> 0), então, o período foi mais chuvoso (ou quente) que o normal, se Anomalia Negativa (< 0), o período foi mais seco (ou frio) que o normal.

Em relação a precipitação, essa variável é construída a partir da variável *PRECTOTCORR* da NASA. Anomalias negativas persistentes indicam secas meteorológicas que afetam a umidade do solo e, consequentemente, a produtividade agrícola e o risco de fogo/desmatamento.

Quanto a variável temperatura, ela foi construída a partir da *T2M* (Temperatura a 2 metros). É crucial para captar estresse térmico. Em modelos econométricos, anomalias de temperatura costumam ter uma relação não-linear com o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e o desmatamento.

Dado que, as informações do MapBiomas são anuais, o índice de anomalia foi consolidado da seguinte forma. Coletou-se o dado diário da NASA. A seguir, agrupou-se em médias/totais mensais. Calculou-se a anomalia para o ano civil para que o "choque" climático coincida com a janela em que o desmatamento e o crédito ocorrem.

Ao usar anomalias padronizadas, remove-se a heterogeneidade espacial fixa. Isso significa que o modelo está olhando para como desvios do padrão climático local afetam o comportamento econômico e ambiental, o que é a regra para identificar causalidade em estudos de clima.

No entanto, visando melhorar o grau de acurácia, ao invés da Anomalia Padronizada, foi utilizado o *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), o qual eleva o rigor técnico, pois o SPEI é padrão na literatura de hidrologia e economia do clima para monitorar secas meteorológicas. Diferente de uma anomalia simples (Z-score), o SPEI reconhece que a chuva não segue uma distribuição normal (Sino de Gauss), mas sim uma distribuição Gamma (onde valores baixos são frequentes e valores extremos são raros). É necessário realçar que, o SPEI foi desenvolvido por Vicente-Serrano, Beguería e López-Moreno em 2010³. Diferente do *Standardized Precipitation Index* (SPI), o qual, usa apenas a precipitação, o SPEI calcula o balanço hídrico, combinando a Precipitação (P) e a Evapotranspiração Potencial (PET). A matemática por trás do SPEI envolve quatro etapas principais.

³ Dado que foi utilizado o pacote SPEI do R para calcular o índice no seu modelo, os mesmos autores publicaram um artigo posterior focado no refinamento do cálculo e na computação do índice, cuja citação é Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014).

Inicialmente, é necessário calcular o Balanço Hídrico (D). Para cada mês i , calcula-se a diferença (D) entre a chuva e a demanda de água da atmosfera:

$$D_i = P_i - PET_i$$

Esse valor D, o qual, está em mm, informa se houve déficit o superávit hídrico naquele mês.

Assim como no SPI, as diferenças são acumuladas para refletir diferentes tipos de impactos (agrícola, hidrológico etc.). Para uma escala de tempo k (por exemplo, 3 meses, 6 meses ou 12 meses), o valor acumulado no mês n é:

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} D_{n-i}$$

Como os valores de D podem ser negativos (déficit) ou positivos (superávit), a distribuição clássica Gamma (usada no SPI) não serve. O SPEI utiliza a Distribuição Log-Logística de três parâmetros (α , β e γ) para modelar a série temporal de D. A função de distribuição cumulativa $F(x)$ para um valor de D é dada por:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1}$$

onde, α corresponde ao parâmetro de escala, β é o parâmetro de forma e γ é o parâmetro de origem (localização).

Por fim, a probabilidade acumulada $F(x)$ é convertida em uma variável Normal Padronizada (com média 0 e desvio padrão 1). Uma aproximação clássica usada para essa transformação é a de Abramowitz e Stegun (1965).

Se $P \leq 0.5$, onde $P = 1 - F(x)$:

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3}$$

onde $W = \sqrt{-2\ln(P)}$ e os termos C e d são constantes matemáticas fixas.

Se $P > 0.5$, substitui-se P por $1 - P$ e inverte-se o valor final do SPEI.

Em termos de interpretação do índice, o valor final do SPEI indica quantos desvios padrões a situação hídrica atual está longe da média histórica. Se $SPEI \geq 2.0$, tem unidade extrema. Se $SPEI = 0$, indica neutralidade ou condições normais. Finalmente, se $SPEI \leq -2.0$ indica seca extrema.

Para obter o ajuste da Distribuição Gamma, utilizou-se a série histórica de precipitação mensal (NASA POWER) e ajustou-se os dados a uma função de densidade de probabilidade Gamma. Isso é necessário porque a chuva não pode ser negativa e tem uma "cauda" longa para a direita (eventos de chuva extrema). A probabilidade acumulada da distribuição Gamma foi então transformada em uma Distribuição Normal Padrão (com média 0 e desvio padrão 1). Como resultado final, o valor do SPI incluído no modelo representa o número de desvios padrão que a chuva daquele período se afastou da média histórica, após a correção da assimetria dos dados.

Para dar suporte na análise da regressão, é útil citar a escala de severidade definida por McKee *et al.* (1993), que é a referência mundial para esse índice, como pode ser observado no Quadro 1.

Qual a justificativa para utilizar o SPEI? Esse índice permite comparar o "choque" entre municípios com climas totalmente diferentes. Um SPEI de -2.0 em Sorriso (MT) representa uma seca tão extrema quanto um SPEI de -2.0 em Uberaba (MG), mesmo que os milímetros de chuva sejam diferentes.

Como foi utilizado um SPEI-12, ou seja, com janela de 12 meses, está captando secas hidrológicas, como a que afetou o volume do Sistema Cantareira, por exemplo. Como o desmatamento e a regeneração florestal são processos medidos anualmente, um índice climático que acumula o estresse de 12 meses evita que "ruídos" de um mês atípico distorçam a tendência anual. Também, o crédito rural e os investimentos em logística, como as hidrovias para a soja no Arco Norte, dependem da estabilidade hídrica de longo prazo. O SPEI-12 é um excelente preditor para a viabilidade dessas operações financeiras.

Em outras palavras, para capturar os choques climáticos exógenos, utilizou-se o *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), que normaliza as variações de precipitação permitindo a identificação de eventos extremos de seca e umidade, eliminando vieses de sazonalidade e heterogeneidade geográfica.

Quadro 1. Valor do SPEI e Categoria de Intensidade

Valor do SPI	Categoria de Intensidade
2.00 ou mais	Extremamente Úmido
1.50 a 1.99	Muito Úmido
1.00 a 1.49	Moderadamente Úmido
-0.99 a 0.99	Próximo ao Normal
-1.00 a -1.49	Seca Moderada
-1.50 a -1.99	Seca Severa
-2.00 ou menos	Seca Extrema

Fonte: McKee *et al.* (1993).

4. MÉTODO

Diferente do modelo Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), que assume uma distribuição normal, o modelo Gamma lida melhor com variáveis dependentes que são estritamente positivas e apresentam assimetria à direita, ou seja, muitos valores pequenos e alguns valores muito altos, como é o caso de áreas desmatadas por município.

O uso da distribuição Gamma em um *Generalized Linear Model* (GLM) com Efeitos Fixos permite modelar dados onde a variância aumenta com a média. Em termos econométricos, está sendo assumido que o impacto de um choque climático (SPI-12) na variabilidade do desmatamento é proporcional à escala da área desmatada. Geralmente, utiliza-se a ligação logarítmica (log). Isso garante que os valores preditos de desmatamento sejam sempre positivos, o que é uma restrição física real, pois, não existe desmatamento negativo.

A forma funcional do modelo pode ser escrita como:

$$E[Y_{it}|X_{it}, \alpha_i] = \mu_{it} = \exp(\beta X_{it} + \alpha_i + \gamma_t)$$

onde: Y_{it} são os desembolsos do BNDES no município i e ano t , cujos registros históricos consolidados advêm das bases oficiais de transparência bancária (BNDES, 2026); X_{it} é o vetor

de SPI-12 ou SPEI-12, calculado a partir de séries climatológicas integradas (NASA POWER) e parametrizado sob distribuições probabilísticas específicas (ABRAMOWITZ; STEGUN, 1965; BEGUERÍA et al., 2014; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010); α_i corresponde ao Efeito Fixo do Município, que captura todas as características invariantes no tempo como as delimitações e restrições biogeográficas do respectivo bioma mapeado (MAPBIOMAS, 2024); e γ_t é o Efeito Fixo de Ano, isto é, captura choques macroeconômicos comuns a todos os municípios, como, por exemplo, o preço da soja no mercado internacional e a taxa de câmbio.

Vantagens de usar a Distribuição Gamma, são as seguintes. Em primeiro lugar, tem-se o tratamento da assimetria, ou seja, os dados históricos de cobertura e uso da terra mapeados por município costumam ter uma cauda longa, isto é, poucos municípios concentram grandes extensões de conversão florestal (MAPBIOMAS, 2024). A Distribuição Gamma acomoda essa característica sem a necessidade de transformar artificialmente a variável dependente em $\log(Y + 1)$, técnica que frequentemente introduz vieses severos nas estimativas. Em segundo lugar, tem-se a interpretação de elasticidades, ou seja, com a adoção da função de ligação $\log$, o coeficiente beta (β) associado ao indicador climático pode ser interpretado como uma variação percentual aproximada na variável dependente para cada alteração unitária observada na escala do índice de anomalia (MCKEE et al., 1993; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010). Finalmente, tem-se o controle de Heterogeneidade, uma vez que, a inclusão de componentes de efeitos fixos limpa os ruídos e a "sujeira" gerados por variáveis omitidas e não mensuráveis, isolando estritamente a causalidade do que se transforma "dentro" do território municipal ao longo dos anos devido às flutuações e choques do clima local.

O Quadro 2 apresenta um resumo comparativo entre os modelos de Mínimos Quadrados Ordinários (OLS), Poisson e Gamma.

Quadro 2. Modelo e Justificativa

Modelo	Justificativa
OLS	Frequentemente falha porque o desmatamento tem muitos zeros ou valores baixos, gerando resíduos não-normais e previsões negativas.

Poisson	Ótimo para contagem (número de focos de incêndio), mas o desmatamento é uma variável contínua (hectares). A Gamma é a versão contínua da Poisson para processos de crescimento/área.
Gamma	Lida com a heterocedasticidade natural dos dados ambientais, onde municípios que desmatam muito tendem a ter uma oscilação (erro) muito maior que municípios estáveis.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com base na amostra dos dados, tem-se uma estrutura de painel agregada por bioma e tempo que cruza uma métrica de anomalia hídrica média (SPEI) com uma contagem de choques (eventos extremos).

Em climatologia, escalas longas como o SPEI-12 não medem variações diárias ou semanais de chuva; elas capturam a seca hidrológica e socioeconômica. Valores persistentemente negativos nessa escala indicam anomalias de longo prazo que afetam o lençol freático, o volume de grandes reservatórios, o fluxo de rios e, consequentemente, grandes projetos de infraestrutura e cadeias logísticas de longo ciclo.

Como por ser apreciado na Tabela 1, valores de -0,995 (Amazônia), -0,993 (Caatinga) e -0,984 (Cerrado) estão estatisticamente classificados como "Próximos ao Normal". Porém, por ser uma escala de 12 meses, isso significa que o balanço hídrico acumulado de um ano inteiro está rodando no limite severo da normalidade. O que pode ser denominado de uma Falsa Normalidade.

Para que a média de 12 meses atinja quase -1,00, isso significa que esses biomas enfrentaram meses consecutivos de déficit hídrico (baixa precipitação somada a altas temperaturas/evapotranspiração), conforme consta na Tabela 1. Eles estão na antessala de uma quebra estrutural de umidade.

Quando o SPEI-12 finalmente rompe a barreira de -1,00 e a Contagem de Choques vai para 1, esse "1" não representa uma chuva forte que faltou ontem, representa uma crise hídrica instalada que provavelmente levou meses para se consolidar (Tabela 1). O SPEI-12 capta a inércia hidrológica.

Também, tem-se a questão da persistência, dado que, o choque aparece no SPEI-12, a tendência é que ele persista por várias observações consecutivas, com autocorrelação serial forte, pois a recuperação de um sistema hidrológico de grande escala exige meses seguidos de chuva acima da média histórica para reverter o quadro.

Tabela 1. Bioma, Anomalia Média e Contagem de Choques

Bioma	Anomalia média	Contagem de choques
Amazônia	-0.995	0
Caatinga	-0.993	0
Cerrado	-0.984	0

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomas e Nasa Power.

Em relação aos desembolsos do BNDES, na faixa de -0,98 a -0,99, o impacto nos desembolsos tende a ser assintótico ou nulo. O mercado e o setor público operam sob aparente normalidade, executando o orçamento planejado.

Por outro lado, quando o painel capturar as observações onde o SPEI-12 cai abaixo de -1,00 ou -1,50, disparando a Contagem de Choques, provavelmente serão observados dois fenômenos distintos nos desembolsos do BNDES. Tem-se uma Contração no Curto Prazo, ou seja, queda brusca nos desembolsos para crédito agrícola tradicional e projetos de infraestrutura/logística que dependem de licenças ambientais ou janelas de obras, como, por exemplo, hidrovias ou portos afetados pelo nível dos rios, devido à paralisação de cronogramas físicos.

Em maior horizonte temporal, ocorre expansão do socorro (*lagged effect*), pois, tem-se um aumento defasado em meses (ou no ano seguinte) em linhas de crédito emergenciais, refinanciamentos de dívidas ou investimentos focados em resiliência climática e mitigação de riscos.

A Tabela 2 apresenta o número de projetos do BNDES que estão sob estresse hídrico para cada um dos três biomas.

Tabela 2. Bioma e Número de Projetos sob Estresse Hídrico

Bioma	Número de Projetos sob Estresse
-------	---------------------------------

Amazônia	21
Caatinga	25
Cerrado	89

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomass e Nasa Power.

Com base nas informações da Tabela 2, tem-se uma métrica direta de impacto econômico e operacional. Portanto, cruzou-se o limiar estatístico e está contabilizando o número de projetos que entraram na zona de estresse dentro de cada bioma.

Considerando que está sendo analisado o SPEI-12, um índice de seca hidrológica e socioeconômica de longo prazo, esse volume de projetos sob estresse revela a vulnerabilidade geográfica e setorial da carteira de fomento, como a do BNDES.

No caso do bioma Caatinga, tem-se o maior volume absoluto (25 projetos), como pode ser observado na Tabela 2. Em outras palavras, embora a Caatinga seja o menor dos três biomas em extensão territorial, ela lidera em número de projetos sob estresse. Em termos econômicos, a Caatinga possui uma vulnerabilidade natural crônica à semiaridez. Projetos financiados nessa região, geralmente, ligados à agricultura familiar estruturada, infraestrutura de abastecimento de água ou energias renováveis, operam com margens hídricas muito estreitas. Como o SPEI-12 captura secas que duram um ano ou mais, 25 projetos sob estresse indicam que a persistência do déficit hídrico rompeu a resiliência operacional crônica da região, impactando diretamente o cronograma físico e financeiro desses empreendimentos.

Em relação ao bioma Amazônia, tem-se 21 projetos sob estresse hídrico (Tabela 2). Ter 21 projetos sob estresse na Amazônia sob a ótica do SPEI-12 é um indicador crítico e acende um sinal de alerta macroeconômico. O Fator Logístico e de Infraestrutura, diferente da Caatinga, a Amazônia não é um bioma estruturalmente seco. Portanto, quando o SPEI-12 atinge níveis de estresse por lá, está-se falando de grandes secas plurianuais, como as que afetam severamente os níveis dos rios navegáveis. Economicamente, na Amazônia, o estresse em 21 projetos provavelmente está associado a gargalos logísticos, tais como, inviabilidade de transporte de safras por hidrovias devido ao baixo calado, interrupções em obras de grande porte que dependem de vias fluviais para transporte de insumos, ou projetos de bioeconomia que sofreram quebras severas pelo clima.

Quanto ao bioma Cerrado, há 89 projetos sob estresse. Nesse caso, é necessário realçar que, o Cerrado é o coração do agronegócio e da expansão de infraestrutura de escoamento do país. O estresse de longo prazo (12 meses) no Cerrado afeta diretamente a macroeconomia do país. Projetos agroindustriais, complexos de armazenamento e ferrovias/rodovias de escoamento sofrem quando o balanço hídrico regional entra em colapso, pois isso afeta a previsibilidade da receita que lastreia os financiamentos de longo prazo.

Foi estimado o modelo de Panel Data de Efeitos Fixos com distribuição de Poisson com interação por Biomas. Para evitar valores nulos, foi aplicado o operador $\ln(x+1)$. Também, é necessário destacar que foi utilizado o modelo dinâmico contendo uma defasagem, pois espera-se que a relação entre anomalia da chuva e desembolsos do BNDES não ocorra contemporaneamente, mas sim, com defasagem de um ano.

O ajuste do modelo apresenta um Pseudo R^2 de 0.848 e uma Correlação ao Quadrado de 0.928, mostrando que a agregação limpou os ruídos individuais e gerou um modelo altamente explicativo.

A seguir, é apresentada a análise econômica com base nos impactos climáticos por bioma. Começando pela Caatinga, seu beta contemporâneo ($\hat{\beta} = 4.168657$), este é o resultado mais forte e estatisticamente significativo do modelo com $p\text{-valor} = 0.0032$, significativo ao nível de significância de 1% (Tabela 3). Esse resultado revela que, Anomalias positivas de chuva no mesmo ano têm um impacto positivo e imediato muito expressivo sobre o valor contratado na Caatinga. Como a Caatinga é uma região historicamente marcada pela restrição hídrica severa, anos mais chuvosos que a média (anomalias positivas) parecem destravar economicamente a contratação de recursos ou investimentos no setor estudado de forma imediata. O efeito do ano anterior ($t-1$) deixa de ser significativo, pois está acima do nível de significância de 10% ($p\text{-valor} = 0.151$), como pode ser observado na Tabela 1. O choque climático na Caatinga opera no presente.

Tabela 3. Resultados do Modelo de Panel Data com Efeitos Fixos com Distribuição de Poisson por Bioma Amazônia, Cerrado e Caatinga

Variáveis	Estimativa	Erro Padrão	z valor	Pr(> z)
name_biome::Amazônia:pre ctotcorr_anomalia_chuva	3.421698	2.510135	1.363153	0.1728343
name_biome::Caatinga:prec totcorr_anomalia_chuva	4.168657	1.41509	2.94586	0.0032206
name_biome::Cerrado:prect otcorr_anomalia_chuva	2.427332	2.228624	1.089162	0.2760825
name_biome::Amazônia:l(p rectotcorr_anomalia_chuva, 1)	1.891572	0.986405	1.917641	0.0551565
name_biome::Caatinga:l(pre ctotcorr_anomalia_chuva, 1)	4.202381	2.927046	1.435707	0.1510856
name_biome::Cerrado:l(pre ctotcorr_anomalia_chuva, 1)	-0.992547	1.647157	- 0.602582	0.546787

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomas e Nasa Power

Em relação ao bioma Amazônia, seu beta contemporâneo tem valor igual a 3.422 ($\hat{\beta}=3.422$), porém, esse parâmetro não é estatisticamente significativo em relação ao choque hídrico contemporâneo, pois seu p-valor está acima do nível de significância de 10% (p-valor = 0.173), como apresentado na Tabela 3. Porém, ocorre impacto defasado de um ano, cujo $\hat{\beta}=1.892$, sendo estatisticamente significativo ao nível de significância de 10%, com p-valor igual a 0.0551. Interpretando esse resultado, no bioma Amazônia, o efeito da anomalia de chuva opera com um ano de atraso. Um ano mais chuvoso se traduz em maior valor contratado apenas no período subsequente. Isso faz muito sentido econômico quando pensando em ciclos de planejamento agrícola de longo prazo ou na burocracia de liberação de grandes volumes de crédito/contratos em regiões de fronteira econômica, onde as decisões demoram a ser operacionalizadas.

No caso do bioma Cerrado, há neutralidade estatística, pois, tanto o efeito contemporâneo quanto o defasado não são estatisticamente significantes, uma vez que, os p-valores contemporâneo e defasado de um período assumem valores iguais a 0.276 e 0.546, respectivamente (Tabela 1). Para os municípios dessa amostra pertencentes ao Cerrado, as oscilações na anomalia de chuva não parecem ditar o comportamento do valor contratado após controlar por tempo e município. Possivelmente, isto se deva ao fato de que nesse bioma utiliza-

se a irrigação, a qual pode compensar total ou parcialmente a falta de chuvas, pelo menos, no curto prazo.

É necessário realçar que, a interpretação dos coeficientes betas segue a lógica de um modelo log-linear. Portanto, o coeficiente mede a semi-elasticidade, ou seja, indica o impacto percentual na variável dependente para cada alteração unitária na variável explicativa.

Nesse caso, a variável explicativa é a anomalia de chuva, que pode ser medida em milímetros ou em desvios-padrão, a interpretação exata é dada pela fórmula: $\% \Delta Y = [e^{\beta} - 1] * 100$. Olhando apenas para os dois coeficientes que apresentaram significância estatística tem-se que $e^{4.168657} - 1 \approx 63.63$. Em termos de interpretação econômica, mantendo todos os efeitos fixos constantes, um aumento de 1 unidade na anomalia de chuva no ano corrente está associado a um aumento esperado de 6.363% (ou aproximadamente 64 vezes mais) no valor total contratado naquele município da Caatinga. O impacto exponencial reflete que o valor contratado na Caatinga é extremamente elástico e reage de forma explosiva a anos com maior segurança hídrica.

No caso do bioma Amazônia com efeito defasado, o cálculo do impacto é $e^{1.891572} - 1 \approx 5.63$. Mantendo os efeitos fixos constantes, um aumento de 1 unidade na anomalia de chuva no ano anterior ($t-1$) está associado a um aumento esperado de 563% (ou cerca de 6,6 vezes mais) no valor contratado no ano atual (t) para um município da Amazônia.

Os resultados indicam que, o efeito do clima sobre o valor contratado existe, mas o canal de transmissão muda conforme o ecossistema. Na Caatinga, bioma semiárido, a resposta econômica à água é imediata e urgente (t). Na Amazônia, bioma de floresta tropical com dinâmicas logísticas e contratuais complexas, o choque climático leva tempo para maturar e se reflete no mercado no ano seguinte ($t-1$). Em outras palavras, o modelo mostra que um choque positivo de chuva expande o valor contratado em ambos os biomas onde houve significância, mas a magnitude e o *timing* são marcadamente distintos, pois, a Caatinga responde no curtíssimo prazo com uma intensidade massiva, com efeito contemporâneo, enquanto a Amazônia absorve o choque de forma mais suave e defasada, efeito no ano seguinte.

A Figura 1, apresenta os impactos contemporâneos do clima nos desembolsos do BNDES por bioma. A Caatinga (Linha Verde), embora comece abaixo das outras nas secas extremas, ela possui a inclinação mais acentuada à medida que o clima melhora. Como esse coeficiente contemporâneo ($\hat{\beta} \approx 4.16$) é o único estatisticamente significativo ao nível de significância de 1%, a linha verde é a grande protagonista da Figura 1. Ela ilustra visualmente a "sensibilidade extrema" do bioma semiárido, logo pequenos incrementos de chuva quando o cenário sai de uma seca severa, por exemplo, de -1.0 para -0.5, geram saltos exponenciais no valor contratado.

Na Figura 1, contemporâneo, os coeficientes associados aos biomas Amazônia e Cerrado não são estatisticamente significantes, logo esses dois biomas são representados por linhas retas nas tonalidades azul e vermelho respectivamente, ou seja, anomalias climáticas não impactam contemporaneamente os desembolsos do BNDES.

Como o coeficiente defasado da Amazônia ($\hat{\beta} = 1.891$) é estatisticamente significativo a 10%, a inclinação ascendente da linha azul na Figura 2 ganha relevância estatística. Ela mostra que uma melhora no regime de chuvas no ano passado eleva o valor contratado do bioma hoje. Em contrapartida, dados que os parâmetros betas dos biomas do Cerrado e da Caatinga não são estatisticamente significativos, ambos são representados pelas linhas nas cores vermelha e verde.

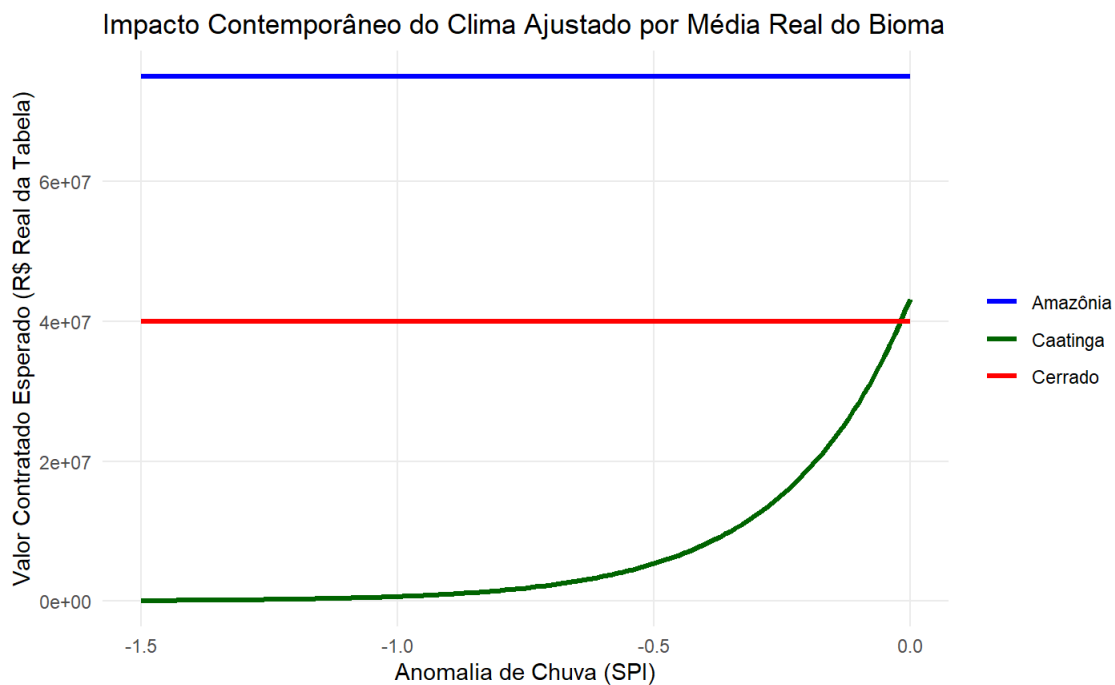


Figura 1. Impacto Contemporâneo do Clima Ajustado por Média Real do Bioma, Amazônia, Cerrado e Caatinga.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomas e Nasa Power.

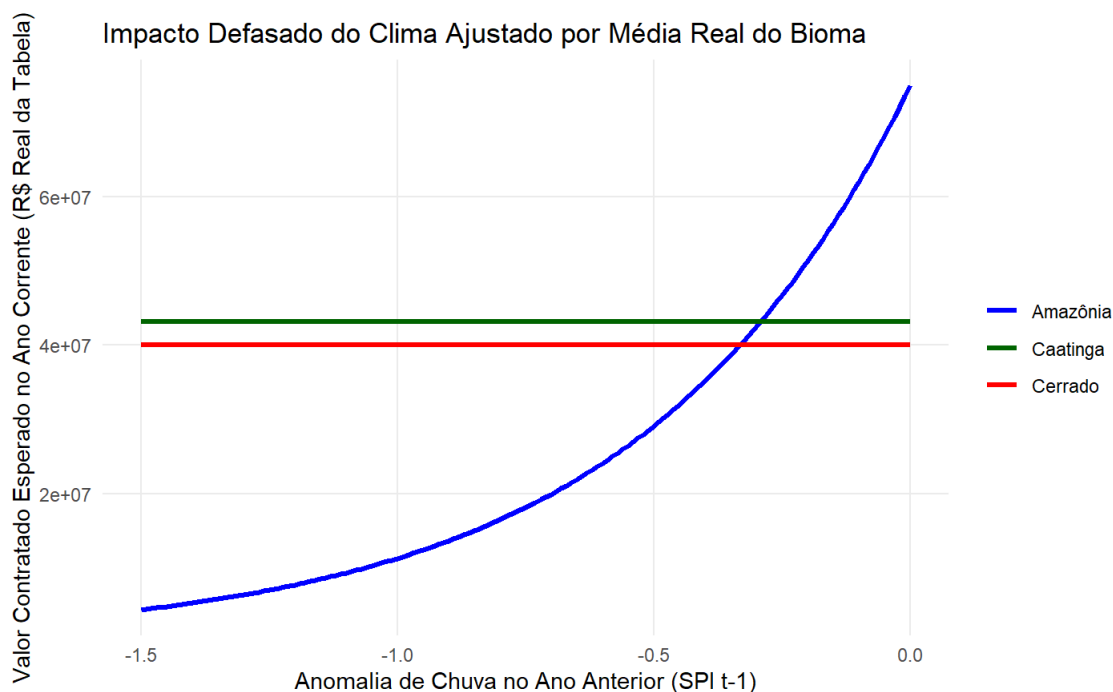


Figura 2. Impacto Defasado do Clima Ajustado por Média Real do Bioma, Amazônia, Cerrado e Caatinga.

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomas e Nasa Power.

Com base na Tabela 4, a coluna Mediana da Anomalia (aproximadamente -1.0 para os três biomas) e a coluna Anomalia Mínima (variando entre -1.4 e -1.47) revelam um detalhe crucial sobre a amostra. Os municípios e anos presentes na base de dados agregada cobrem um período predominantemente marcado por anomalias negativas de chuva (secas). Uma mediana de SPEI-12 próxima a -1.0 significa que metade das observações está enfrentando o que a meteorologia classifica como "seca moderada a severa".

Tabela 4. Bioma, Número de Projetos, Valor Médio dos Projetos, Mediana da Anomalia, Desvio Padrão da Anomalia e Anomalia mínima

Nome do Bioma	Número de Projetos	Valor Médio dos Projetos	Mediana da Anomalia	Desvio Padrão da Anomalia	Anomalia Mínima
Amazônia	351	74892072	-1.01	0.162	-1.47
Caatinga	1066	43158642	-0.997	0.0898	-1.43
Cerrado	1353	40009538	-0.998	0.165	-1.4

Fonte: Elaborada pelos autores com base em BNDES, MapBiomas e Nasa Power.

As Figuras 1 e 2 mostram o comportamento dos desembolsos exatamente na janela de maior estresse climático (de -1.5 a 0.0). Portanto, o modelo não está prevendo um cenário hipotético; na verdade, representa a realidade empírica da amostra utilizada, a qual, incorpora 15 anos, com início em 2010 e final em 2025.

No modelo contemporâneo, o único coeficiente altamente significativo (1%) foi o da Caatinga. Observando para a coluna Número de Projeto, a Caatinga tem 1.066 registros na base desagregada original (Tabela 4). O Cerrado tem 1.353 (Tabela 4). A Amazônia tem apenas 351 (Tabela 4). A Caatinga tem quase o triplo de projetos/dados históricos registrados se comparada à Amazônia nesta amostra. Na estatística, amostras maiores e com menor dispersão climática (o desvio-padrão da Caatinga, Desvio Padrão Anormal = 0.089, é o menor de todos) geram estimativas muito mais precisas (erros-padrão menores). Isso explica perfeitamente por que o efeito contemporâneo da Caatinga foi capturado com tanta força e precisão pelo modelo econômico, enquanto a Amazônia, por ter menos projetos e maior variabilidade climática ($DP = 0.162$), precisou do modelo de defasagem temporal para conseguir revelar o seu padrão (Tabela 4).

À guisa de conclusão, a análise descritiva da amostra com base na Tabela 4, revela uma predominância de períodos de restrição hídrica em todos os biomas estudados, com medianas de anomalia de chuva (SPEI-12) historicamente fixadas próximas a -1.0. Adicionalmente, observa-se uma marcada heterogeneidade no volume de projetos e nos valores médios contratados, com a Amazônia apresentando o maior *ticket* médio por projeto (R\$ 74,8 milhões), porém com o menor número de registros (351), enquanto a Caatinga e o Cerrado concentram o maior volume de dados amostrais.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise estatística e econométrica baseada no índice SPEI-12 revela que os riscos climáticos exercem um papel determinante e heterogêneo sobre a dinâmica de concessão de fomento financeiro do BNDES nas diferentes regiões do país. O diagnóstico de uma "falsa

normalidade" hídrica generalizada nos dados amostrais — em que as medianas das anomalias acumuladas de 12 meses rondam o limiar de secas moderadas a severas — acende um sinal de alerta para a sustentabilidade e a previsibilidade física e financeira de projetos agroindustriais e de infraestrutura logística de longo curso.

A expressiva elasticidade evidenciada no bioma Caatinga comprova que a atividade econômica regional responde de forma explosiva e imediata à maior segurança hídrica. Por outro lado, a maturação defasada dos choques na Amazônia evidencia a complexidade de seus ciclos produtivos e burocráticos, demandando estruturas de crédito flexíveis e resilientes a choques plurianuais. Por fim, a neutralidade de curto prazo observada no Cerrado sugere que investimentos em infraestrutura produtiva (como sistemas de irrigação) servem temporariamente como um colchão amortecedor, embora não isentem a região dos riscos de estresse hídrico de longo prazo.

Fica claro que a mitigação desses cenários exige que o BNDES atue de forma contracíclica e estratégica, aprimorando mecanismos de transição ecológica (como o Fundo Clima e as Linhas Verdes), aplicando critérios ASG rígidos e cruzando dados geográficos estruturados com o Zoneamento Agrícola de Risco Climático (ZARC) para blindar sua carteira e direcionar os recursos para onde a resiliência socioambiental é mais urgente.

7. LITERATURA CITADA

ABRAMOWITZ, Milton; STEGUN, Irene A. *Handbook of mathematical functions: with formulas, graphs, and mathematical tables*. New York: Dover Publications, 1965. v. 55.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (Brasil). BNDES Aberto: Desembolsos históricos por município e setor. Rio de Janeiro: BNDES, 2026. Disponível em: <https://dados.bndes.gov.br/>. Acesso em: [02 /maio/2026].

Dados de Precipitação: NASA POWER (Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, MERRA-2).

McKEE, Thomas B.; DOESKEN, Nolan J.; KLEIST, John. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied*

Climatology. Anaheim, California: American Meteorological Society, 1993. v. 17, n. 22, p. 179-183.

BEGUERÍA, Santiago; VICENTE-SERRANO, Sergio M.; REIG, Fergus; LATORRE, Borja. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, statistical distribution, and theoretical topics. *International Journal of Climatology*, v. 34, n. 10, p. 3001-3023, 2014.

MAPBIOMAS. Estatísticas de Cobertura e Uso da Terra: dados municipais/estaduais [adaptar se necessário] (Coleção 9.0). São Paulo: Projeto MapBiomass, 2024. Disponível em: <https://mapbiomas.org/estatisticas>. Acesso em: 03 mai. 2026.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A multiscalar standardized precipitation evapotranspiration index: a new drought index for climate change analysis and mitigation. *Journal of Climate*, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.



PSP Hub

INFRASTRUCTURE AND URBANISM STUDIES

